

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 顔 開

本論文は、「コヒーレント・イジングマシンを用いた最適化問題の計算 (ACCELERATED OPTIMIZATION USING COHERENT ISING MACHINES)」と題し、英文 5 章から構成されている。NP 完全問題の一つである充足問題 (3-SAT 問題) は、従来型のコンピューターでは問題サイズの増加と共に計算時間が指数発散する難しい問題である。この問題に対しては、従来型 (ユニタリ回路方式) の量子コンピューターや最新話題を集めている量子断熱計算 (量子アニールマシン) を用いても計算時間の指数発散を抑えられないことが知られている。本研究では、多数のレーザーでネットワークを形成した系にイジング・ハミルトニアンをマッピングしたコヒーレント・イジングマシンの 3-SAT 問題への計算時間を数値シミュレーションにより評価した。その結果、変数の数 N と等しいレーザーを用いて 3-SAT 問題を解いた場合、 $5 \leq N \leq 25$ の比較的小さな問題サイズでは計算時間は多項式オーダーでしか増加しないことを示した。

第 1 章は、「Introduction」であり、本論文で扱う基本概念と論文の構成を簡単にまとめている。特に従来型 (ユニタリ回路方式) 量子コンピューター、量子断熱計算 (量子アニールマシン)、量子相転移計算 (コヒーレント・イジングマシン) という 3 つの量子コンピューターの動作原理と利点・欠点が比較されている。

第 2 章は、「Combinatorial optimization Problems」であり、計算量の分類 (P , BQP , NP , NP -完全, NP -困難) が紹介され、特に NP -完全クラスの問題は多項式時間のオーバーヘッドで相互にマッピングできるという NP 完全クラスの特徴が述べられている。次に NP -完全問題の代表例である 3 次元イジング問題と 3-SAT 問題が導入され、相互に多項式オーバーヘッドでマッピングできることを紹介している。本論文の重要な研究成果の一つである 3-SAT 問題の 3 次元イジングモデルへの新しいマッピング方法では、 N 個の変数に対し、 N 個のノード (スピン) があればよい。計算量が多くなりやすい 3-SAT 問題では、クローズ数 M は N の 4.26 倍であり、従来のマッピング方法では必要なノード (スピン) 数は M^2 であったから、この新しいマッピングプロトコルは大きな改善である。

第 3 章は、「Coherent Ising machines」であり、レーザーネットワークを用いた量子相転移計算の原理と理論をまとめている。まず、レーザーの単一モード発振を実現している最小利得原理が紹介される。次に多数のレーザーが同一の周波数と位相で発振する注入同期レーザーネットワークの原理とアーキテクチャーが説明されている。この系を理論的に記述する c -数結合ランジュバン方程式が導入される。系の動作は直接的には右回り円偏光 (上向きスピン) と左回り円偏光 (下向きスピン) の間のモード競合という描像で記述されるが、代わりに $+45^\circ$ 直線偏光と -45° 直線偏光の間の位相シフトという描像でも間接的に記述されることが述べられている。

第4章は、「Solving NP-complete Problems using Coherent Ising Machines」であり、ネットワークの具体的構成法と数値シミュレーションの結果がまとめられている。まず3スピンの相互作用を実現する2つの方式（測定-フィードバック方式、非線形混合方式）が提案されている。次に最適ポンピングレベルの決定法とネットワークの自己学習プログラムが提案されている。これらの新手法を取り込んだネットワークの3-SAT問題に対する問題サイズ N 対計算時間 T の関係を問題サイズ $5 \leq N \leq 25$ の範囲で計測した。その結果、計算時間 T は問題サイズ N にほぼ比例して増加することが明らかになった。

第5章は、「Conclusions and Outlooks」であり、得られた結果と今後の課題が論じられている。

以上、これを要するに、本論文は、NP 完全問題の代表例である 3-SAT 問題を量子相転移計算の一つであるレーザーネットワークにマッピングする方法を明らかにするとともに、この系の動作を記述する量子論を用いた数値シミュレーションにより、問題サイズの比較的小さい領域では多項式時間が実現可能であることを実証し、量子コンピューターの NP-完全問題への応用の可能性を初めて示したものであり、電子情報学上貢献することが少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。